

FORRAGEIRAS DE BAIXO CARBONO COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAÇÃO DE METANO ENTÉRICO NA PECUÁRIA BRASILEIRA

Sabriny Oliveira de Souza¹, Maria Eduarda Silva Dias¹, Vinícius Valim Pereira¹

¹ Universidade Estadual de Minas Gerais, Divinópolis, Brasil
(sabriny.oliveira@hotmail.com)

Resumo: A pecuária bovina é uma importante fonte de metano entérico, contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa. Forrageiras tropicais com compostos bioativos apresentam potencial para reduzir a metanogênese ruminal. Esta revisão analisa evidências sobre o uso dessas espécies na mitigação de emissões, destacando mecanismos de ação, eficiência e aplicabilidade em sistemas produtivos sustentáveis.

Palavras-chave: Metano entérico; Forrageiras tropicais; Pecuária de baixo carbono; Compostos bioativos; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais configuram-se como um dos principais desafios técnico-científicos e socioeconômicos da contemporaneidade, sendo impulsionadas pelo aumento contínuo das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), especialmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Entre esses gases, o metano destaca-se por seu elevado potencial de aquecimento global, superior ao do CO₂ em horizontes de 100 anos, além de apresentar maior eficiência radiativa no curto prazo (IPCC, 2019; IPCC, 2023). Nesse cenário, a mitigação das emissões de CH₄ tem sido considerada uma estratégia prioritária para desacelerar o aquecimento global nas próximas décadas (FAO, 2023).

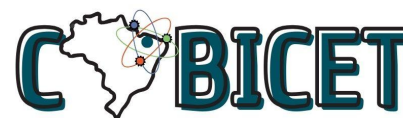
A relevância do metano no contexto climático internacional foi consolidada a partir do Acordo de Paris, firmado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21), que estabeleceu metas globais para limitar o aumento da temperatura média do planeta a valores inferiores a 2 °C, com esforços adicionais para restringi-lo a 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais (TORRES et al., 2017). Como instrumento operacional desse acordo, os países signatários definiram suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que orientam as estratégias nacionais de mitigação e adaptação às mudanças climáticas (IPCC, 2023).

A intensificação das mudanças climáticas tem direcionado a atenção da comunidade científica para as emissões de GEE provenientes das atividades agropecuárias, especialmente da pecuária bovina. Em

escala global, o setor pecuário representa parcela significativa das emissões antrópicas, sendo responsável por uma fração expressiva das emissões de metano. No Brasil, esse cenário é particularmente relevante, uma vez que o país possui um dos maiores rebanhos bovinos do mundo e a pecuária configura-se como uma das principais fontes de emissões no setor agropecuário, contribuindo com aproximadamente 17% das emissões nacionais (SEEG, 2023). O compromisso brasileiro envolve a redução de 37% das emissões de GEE até 2025, com base nos níveis de 2005, além de metas indicativas para 2030 (TORRES et al., 2017).

Nesse contexto, o estado de Minas Gerais destaca-se tanto pela expressiva produção leiteira, respondendo por aproximadamente 27,4% da produção nacional, quanto pelo elevado número de animais, reforçando a importância de estratégias regionais voltadas à mitigação dessas emissões (IBGE, 2024). Entretanto, a predominância de sistemas extensivos baseados em pastagens tropicais frequentemente degradadas resulta em baixa eficiência produtiva e maior intensidade de emissão de GEE por unidade de produto (SEEG, 2023).

A pecuária de ruminantes assume papel central nesse cenário, sendo responsável por parcela significativa das emissões de metano devido ao processo de fermentação entérica. Esse processo ocorre no rúmen, um ambiente anaeróbio altamente especializado, onde microrganismos degradam carboidratos estruturais e não estruturais, liberando hidrogênio (H₂) como subproduto metabólico. Arqueias metanogênicas utilizam esse hidrogênio para reduzir o dióxido de carbono, formando metano, que é



posteriormente eliminado pelo animal principalmente via eructação (BERCHIELLI et al., 2012; BEAUCHEMIN et al., 2020).

A relevância da mitigação do metano (CH₄) na pecuária brasileira não se restringe apenas ao cumprimento de acordos internacionais, como o Acordo de Paris, mas também ao incremento da eficiência produtiva. Estima-se que a metanogênese ruminal represente uma perda significativa para o animal, variando de 2% a 12% da energia bruta ingerida, dependendo da qualidade e quantidade da dieta (LASCANO; CÁRDENAS, 2010).

Embora a metanogênese desempenhe papel fundamental na manutenção do equilíbrio ruminal, ela representa uma perda energética significativa para o animal, podendo variar de 2% a 12% da energia bruta ingerida. Dessa forma, a mitigação do metano entérico apresenta caráter dual, contribuindo simultaneamente para a sustentabilidade ambiental e para a eficiência produtiva dos sistemas pecuários (BERCHIELLI et al., 2012; BEAUCHEMIN et al., 2020).

Diante desse contexto, a necessidade de conciliar produtividade e sustentabilidade tem impulsionado o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à mitigação das emissões no setor agropecuário. Destaca-se o Plano ABC+, que estabelece diretrizes para a adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono, incluindo a recuperação de pastagens degradadas, o plantio direto e a integração de sistemas produtivos (BRASIL, 2012; TORRES et al., 2017). Entre essas abordagens, sistemas integrados como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) têm se destacado por promover sinergias entre produção vegetal, animal e florestal, aumentando o sequestro de carbono e melhorando a eficiência dos sistemas (TORRES et al., 2017).

Paralelamente às estratégias em nível de sistema produtivo, a nutrição animal surge como uma das ferramentas mais eficientes e de rápida aplicação para a redução das emissões de metano entérico. A manipulação da dieta pode alterar profundamente o padrão de fermentação ruminal, influenciando a produção de ácidos graxos voláteis e o balanço de hidrogênio no rúmen (BEAUCHEMIN et al., 2020).

Nesse contexto, o uso de forrageiras tropicais de alta qualidade nutricional, especialmente aquelas ricas em metabólitos secundários bioativos como taninos, saponinas e terpenoides, apresenta elevado potencial para mitigação das emissões. Esses compostos atuam por diferentes mecanismos, incluindo a formação de complexos com nutrientes, a inibição de microrganismos metanogênicos, a redução da

população de protozoários e a modificação dos padrões fermentativos, promovendo maior eficiência na utilização dos nutrientes (GOEL; MAKKAR, 2012; JAYANEGARA et al., 2012; ROQUES et al., 2024).

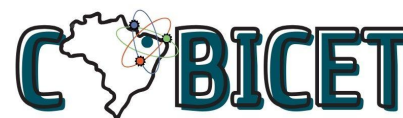
Espécies forrageiras tropicais como *Leucaena leucocephala*, *Cajanus cajan*, *Stylosanthes spp.* e *Arachis pintoi* têm se destacado pelo potencial antimetanogênico e pela boa adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras, configurando-se como alternativas naturais e acessíveis para sistemas produtivos mais sustentáveis. Estudos indicam que a inclusão de forrageiras ricas em taninos pode reduzir as emissões de metano em até 25%, sem prejuízos significativos ao desempenho animal, quando manejadas adequadamente (JAYANEGARA et al., 2012).

Além dessas abordagens, outras estratégias nutricionais complementares também vêm sendo investigadas, como a inclusão de nitratos na dieta, que atuam como aceptores alternativos de elétrons, e a intensificação alimentar com maior proporção de concentrados, que favorece a produção de propionato e reduz a disponibilidade de hidrogênio para a metanogênese (NATEL et al., 2016; PEDREIRA et al., 2013).

Avanços recentes na área de quimioinformática têm ampliado as possibilidades de identificação e desenvolvimento de compostos bioativos com potencial antimetanogênico, por meio de ferramentas como modelagem molecular e análises de relação estrutura-atividade (QSAR) (ROQUES et al., 2024).

Apesar do avanço significativo da pesquisa científica, ainda existe uma lacuna entre o conhecimento gerado e sua aplicação prática no campo. Muitos produtores rurais desconhecem o papel da alimentação na emissão de metano, o que limita a adoção de estratégias mitigadoras. Essa “brecha de mitigação” evidencia a necessidade de maior integração entre pesquisa, extensão rural e políticas públicas, bem como da difusão de informações de forma acessível (HERRERO et al., 2016).

Sob a ótica do balanço global de gases de efeito estufa, dados consolidados pela FAO (2023) indicam que o setor pecuário é responsável por aproximadamente 14,5% das emissões antrópicas mundiais, sendo que a fermentação entérica isolada contribui com cerca de 40% desse total. Os bovinos de corte e leite respondem pela maior parcela dessas emissões, especialmente em sistemas baseados em pastagens tropicais, nos quais a baixa qualidade nutricional e a sazonalidade da forragem comprometem a eficiência de conversão alimentar



(HERRERO et al., 2016; BEAUCHEMIN et al., 2020). No contexto brasileiro, estima-se que a intensidade de emissão de CH₄ varie entre 20 e 30 kg de CH₄ por animal por ano em sistemas extensivos, podendo ser reduzida em até 40% mediante a adoção de práticas de intensificação sustentável, como a recuperação de pastagens degradadas e o aumento da eficiência reprodutiva do rebanho (SEEG, 2023).

O processo de metanogênese ruminal envolve uma complexa interação entre os diferentes grupos microbianos presentes no rúmen, incluindo bactérias fibrolíticas, amilolíticas, protozoários ciliados, fungos anaeróbios e arqueias metanogênicas. As arqueias do filo Euryarchaeota, particularmente dos gêneros *Methanobrevibacter*, *Methanomicrobium* e *Methanosphaera*, são as principais responsáveis pela conversão de hidrogênio e dióxido de carbono em metano, através de uma rota bioquímica catalisada por enzimas específicas como a metil-coenzima M redutase (MCR). A compreensão detalhada desses microrganismos e de suas vias metabólicas constitui base fundamental para o desenvolvimento de estratégias mitigadoras direcionadas, uma vez que permite identificar pontos de intervenção que reduzam a produção de metano sem comprometer a função ruminal e o desempenho animal (BERCHIELLI et al., 2012; ROQUES et al., 2024).

As forrageiras tropicais ocupam papel estratégico nesse cenário em razão de sua adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras, sua elevada produção de biomassa e seu potencial de sequestro de carbono no solo. Gêneros como *Urochloa* (anteriormente *Brachiaria*), *Megathyrus* (anteriormente *Panicum*) e *Cynodon* dominam as áreas de pastagem cultivada no país, enquanto leguminosas como *Stylosanthes*, *Leucaena*, *Cajanus* e *Arachis* têm sido progressivamente incorporadas em sistemas de consorciação e em bancos de proteína. A diversificação do componente forrageiro, aliada à presença de metabólitos secundários com propriedades antimetanogênicas, oferece oportunidade única para conciliar produtividade e sustentabilidade ambiental, especialmente em regiões como o Cerrado e a Mata Atlântica de Minas Gerais, onde se concentra parcela expressiva da pecuária leiteira nacional (IBGE, 2024; ROQUES et al., 2024).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo analisar criticamente a literatura científica acerca do uso de forrageiras tropicais como estratégia para mitigação das emissões de metano entérico, discutindo seus mecanismos de ação, potencial de aplicação e desafios para sua adoção em sistemas produtivos.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em uma revisão de literatura com abordagem qualitativa, voltada à análise crítica do papel de forrageiras tropicais na mitigação das emissões de metano entérico em sistemas de produção de ruminantes. A escolha desse tipo de estudo fundamenta-se na necessidade de integrar resultados dispersos na literatura, permitindo uma visão ampla sobre os mecanismos envolvidos e as possibilidades de aplicação no contexto da pecuária de baixo carbono.

A etapa de levantamento bibliográfico foi conduzida por meio de consultas a bases de dados científicas consolidadas, dentre as quais se destacam Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. A seleção dessas plataformas considerou sua relevância para as áreas de produção animal, mudanças climáticas e nutrição de ruminantes. As buscas foram realizadas de forma progressiva, sendo ajustadas conforme a pertinência dos resultados obtidos.

Para a recuperação dos estudos, foram empregados termos-chave em português e inglês relacionados à temática, incluindo expressões como “enteric methane”, “methane emissions”, “tropical forages”, “secondary compounds”, “ruminal fermentation” e “sustainable livestock”. Esses descritores foram combinados estrategicamente com operadores booleanos, permitindo direcionar os resultados para estudos que abordassem simultaneamente forrageiras e emissões de metano.

A seleção dos materiais não se restringiu exclusivamente a um recorte temporal rígido; no entanto, priorizaram-se publicações mais recentes, especialmente aquelas desenvolvidas nas últimas duas décadas, período marcado pelo avanço das discussões sobre mudanças climáticas e intensificação sustentável da produção pecuária. Trabalhos clássicos foram incluídos quando essenciais para a compreensão dos fundamentos da fermentação ruminal e da atuação de compostos bioativos.

Os estudos considerados relevantes foram aqueles que abordavam diretamente a relação entre alimentação de ruminantes e produção de metano, com ênfase em pesquisas envolvendo forrageiras tropicais ou compostos secundários de origem vegetal. Nesse contexto, foram incluídos trabalhos conduzidos sob diferentes condições experimentais, como ensaios laboratoriais (in vitro), estudos com animais (in vivo) e revisões sistematizadas.

Por outro lado, foram desconsiderados estudos que não apresentavam conexão direta com o tema proposto, bem como aqueles com informações incompletas, ausência de metodologia clara ou foco em sistemas não relacionados à produção de

ruminantes. Publicações duplicadas ou indisponíveis na íntegra também foram excluídas do processo.

A triagem dos artigos ocorreu de maneira sequencial, iniciando-se pela análise dos títulos, seguida da leitura dos resumos e, posteriormente, da avaliação completa dos textos selecionados. Esse processo permitiu refinar progressivamente o conjunto de estudos, garantindo maior aderência ao objetivo da pesquisa e qualidade das informações utilizadas.

Após a definição do corpus de análise, as informações extraídas dos estudos foram organizadas de acordo com critérios temáticos, contemplando aspectos como o tipo de forrageira avaliada, a presença de compostos bioativos, os efeitos observados sobre a produção de metano e as condições experimentais em que os resultados foram obtidos. Essa organização possibilitou estabelecer comparações entre diferentes abordagens e identificar tendências recorrentes na literatura.

Como complemento à revisão, foram considerados dados provenientes de estudos associados ao banco TROPFORAGE-DB, que reúne informações sobre compostos secundários de forrageiras tropicais e suas interações em nível molecular. A incorporação desses dados contribuiu para ampliar a compreensão dos possíveis mecanismos envolvidos na redução da metanogênese, especialmente no que se refere à atuação de metabólitos com potencial antimetanogênico.

A interpretação dos resultados foi conduzida de forma integrada, buscando relacionar os achados científicos com sua aplicabilidade em sistemas produtivos reais. Nesse sentido, foram consideradas não apenas as respostas observadas em condições controladas, mas também as limitações e desafios associados à adoção dessas estratégias no campo.

Para garantir maior rigor metodológico no processo de seleção, adotaram-se princípios inspirados em diretrizes de revisões sistemáticas, como o PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), considerando, na medida do possível, as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos. As publicações selecionadas foram ainda categorizadas de acordo com a natureza experimental, distinguindo-se entre estudos *in vitro* (utilizando técnicas como a produção cumulativa de gás e câmaras de fermentação ruminal artificial), *in vivo* (com mensuração direta da emissão de CH₄ por técnicas como SF₆, câmaras respirométricas e GreenFeed) e estudos de modelagem matemática baseados em equações de predição como as propostas pelo IPCC (2019) e pela FAO (2023).

Também foram consideradas publicações de caráter institucional provenientes de organizações como a

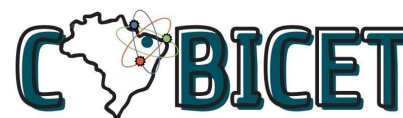
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) e organismos internacionais como a Food and Agriculture Organization (FAO) e o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Esses documentos forneceram dados consolidados sobre inventários de emissões, estatísticas de rebanho e diretrizes metodológicas, complementando os achados das publicações científicas indexadas. A combinação dessas fontes primárias e secundárias possibilitou uma visão multidimensional do tema, integrando aspectos científicos, técnicos, ambientais e econômicos.

A análise comparativa entre as fontes permitiu a identificação de padrões recorrentes nos resultados experimentais, especialmente em relação ao percentual de redução de metano associado a diferentes classes de metabólitos secundários. Foram consideradas, ainda, as limitações metodológicas relatadas pelos próprios autores, como a variabilidade experimental, o tempo de adaptação ruminal, a espécie e a categoria animal utilizada, bem como o nível de inclusão dos compostos. Esses elementos foram fundamentais para uma interpretação crítica dos achados e para o estabelecimento de inferências robustas sobre o real potencial mitigador de cada estratégia.

Tabela 1 – Espécies forrageiras e Potencial Mitigador associado

Espécie	Metabólitos principais	Impacto mitigador
<i>Leucaena leucocephala</i>	Taninos e terpenoides	Leguminosa principal - alto potencial antimetanogênico
<i>Cajanus cajan</i> (guandu)	Carvacrol	Alta afinidade com a enzima MCR
<i>Stylosanthes guianensis</i>	Compostos fenólicos	Redução da metanogênese e aporte proteico
<i>Arachis pintoi</i>	Flavanoides	Alta digestibilidade e eficiência energética
<i>Megathyrus maximus</i> cv. Mombaça	Terpenos voláteis	Melhora na relação propionato:acetato

Fonte: (Autores, 2026)



Por fim, a análise permitiu identificar lacunas relevantes na produção científica, como a necessidade de estudos de longo prazo em condições tropicais, a influência de fatores ambientais na composição das forrageiras e a escassez de pesquisas que integrem, de forma simultânea, aspectos produtivos, ambientais e econômicos. Essas lacunas reforçam a importância de novas investigações voltadas à consolidação de sistemas pecuários mais sustentáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a utilização de forrageiras tropicais com metabólitos secundários bioativos apresenta elevado potencial na mitigação das emissões de metano entérico, com reduções estimadas entre 20% e 35% por animal. Esse intervalo está coerente com a literatura, embora estudos reportem variações em função da espécie forrageira, nível de inclusão na dieta, condições experimentais e adaptação da microbiota ruminal ao longo do tempo. Nesse contexto, os mecanismos bioquímicos envolvidos são múltiplos e complementares, incluindo a inibição enzimática direta da metil-coenzima M redutase (MCR), o efeito antiprotozoário e o desvio do fluxo de hidrogênio (H_2) no rúmen. Esses processos reduzem a disponibilidade de substrato para a metanogênese e favorecem vias alternativas, como a produção de propionato, contribuindo para maior eficiência energética (LASCANO; CÁRDENAS, 2010; GOEL; MAKKAR, 2012). Adicionalmente, ROQUES et al. (2024) destacam que tais compostos promovem alterações mais amplas na dinâmica fermentativa, enquanto BEAUCHEMIN et al. (2020) ressaltam que a magnitude da mitigação pode ser limitada por fatores como adaptação microbiana e possíveis efeitos sobre a digestibilidade.

A mensuração precisa da emissão de metano entérico em condições de pastejo é fundamental para validar as estratégias de mitigação, sendo a técnica do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6) a mais utilizada em estudos de campo no Brasil. O método consiste na inserção de um tubo de permeação (cápsula de latão) no rúmen do animal, que libera o gás SF_6 em uma taxa constante e conhecida. O gás exalado e o metano eructado pelo animal são coletados continuamente por meio de um tubo capilar de aço inoxidável conectado a um cilindro sob vácuo fixado ao dorso do animal.

As adaptações metodológicas propostas por Berchielli et al. (2012) e Pedreira et al. (2013) destacam a necessidade de calibrar rigorosamente as taxas de liberação das cápsulas e considerar as concentrações de gases no ambiente para correção

dos resultados. Após a coleta, que geralmente dura cinco dias consecutivos, as concentrações de CH_4 e SF_6 no cilindro são determinadas por cromatografia gasosa. A taxa de emissão de metano é então calculada relacionando a proporção de ambos os gases no cilindro com a taxa de liberação conhecida do traçador no rúmen.

Entre os compostos bioativos, os taninos e as saponinas destacam-se pelo potencial de aplicação prática em sistemas tropicais. Os taninos condensados podem reduzir a metanogênese em cerca de 13% a 15%, principalmente por meio da complexação com proteínas e da inibição de microrganismos ruminais. No entanto, sua utilização deve ser cuidadosamente manejada, uma vez que níveis elevados podem comprometer a digestibilidade da fibra e o consumo alimentar. Por outro lado, as saponinas atuam de forma mais seletiva, promovendo a desestabilização da membrana de protozoários e reduzindo a emissão de metano em até 20%, sem impactos significativos sobre a degradabilidade da matéria seca quando utilizadas em concentrações adequadas (CARULLA et al., 2005). Complementarmente, os terpenoides, como carvacrol, timol e eugenol, têm demonstrado elevada eficiência mitigadora, com reduções que podem alcançar 34%, sendo considerados alternativas naturais promissoras frente a aditivos sintéticos (TIMMERMAN et al., 2021).

A utilização de metabólitos secundários presentes em forrageiras tropicais atua por diferentes vias no ambiente ruminal. Os taninos condensados, por exemplo, reduzem a metanogênese ao formar complexos com proteínas e inibir diretamente microrganismos como as arqueias metanogênicas e protozoários ciliados (LASCANO; CÁRDENAS, 2010; SOUZA et al., 2026). Adicionalmente, a suplementação com lipídios e óleos vegetais tem demonstrado eficácia na redução de CH_4 por meio da bio-hidrogenação de ácidos graxos insaturados, processo que captura o hidrogênio livre no rúmen, além de exercer um efeito tóxico direto sobre protozoários e bactérias fibrolíticas (BERCHIELLI et al., 2012). No entanto, é necessário cautela no nível de inclusão desses compostos, pois altas concentrações de taninos ou gorduras podem comprometer a digestibilidade da fibra e o consumo de matéria seca (LASCANO; CÁRDENAS, 2010; BERCHIELLI et al., 2012).

No que se refere ao potencial mitigador de espécies forrageiras, observa-se uma distinção relevante entre gramíneas tropicais (C4) e leguminosas (C3). As gramíneas, devido ao elevado teor de fibra em detergente neutro (FDN), favorecem a fermentação acética, aumentando a produção de hidrogênio e,

consequentemente, de metano. Em contrapartida, a inclusão de leguminosas na dieta melhora a qualidade nutricional, eleva o teor proteico e promove alterações no padrão fermentativo, contribuindo para a redução da metanogênese. Espécies como *Leucaena leucocephala*, *Cajanus cajan*, *Stylosanthes guianensis* e *Arachis pintoi* destacam-se tanto pela presença de metabólitos secundários quanto pela capacidade de aumentar a eficiência alimentar. Mesmo algumas gramíneas, como *Megathyrsus maximus*, podem apresentar melhorias na relação propionato:acetato quando manejadas adequadamente, evidenciando que o efeito mitigador depende da interação entre espécie e manejo (BEAUCHEMIN et al., 2020; GOEL; MAKKAR, 2012; ROQUES et al., 2024).

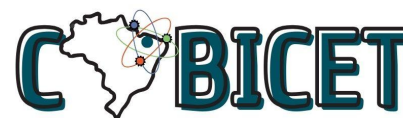
Sob a perspectiva produtiva e econômica, os resultados demonstram que a adoção dessas estratégias pode resultar em aumento de 3% a 8% na eficiência alimentar, refletindo diretamente na viabilidade prática da mitigação. Esse ganho está associado à menor perda de energia na forma de metano, o que melhora a conversão alimentar. No entanto, esse efeito não é uniforme, podendo variar conforme o equilíbrio entre os benefícios mitigadores e possíveis efeitos antinutricionais, especialmente no caso de taninos em altas concentrações (JAYANEGARA et al., 2012). Além disso, estratégias nutricionais complementares, como o uso de nitrato de cálcio como fonte de nitrogênio não proteico, demonstram potencial adicional ao atuar como dreno de hidrogênio no rúmen, reduzindo a metanogênese e, simultaneamente, diminuindo os custos da dieta (NATEL et al., 2016). A inclusão de concentrados também contribui para a redução das emissões, podendo diminuir em até 33% as perdas de energia bruta como metano, ao favorecer a fermentação propiônica (PEDREIRA et al., 2013).

O diferimento de pastagens, técnica tradicionalmente empregada em sistemas tropicais brasileiros, merece análise específica no contexto da mitigação de metano. Essa prática consiste no fechamento de áreas de pastagem ao final do período das águas para utilização durante a estação seca, garantindo aporte alimentar em períodos de baixa produção forrageira. Entretanto, o material diferido apresenta tipicamente menor digestibilidade, maior teor de fibra em detergente neutro e menor concentração de proteína bruta, fatores que aumentam a perda de energia bruta como metano. Estudos recentes conduzidos por Pereira et al. (2026) com *Urochloa decumbens* cv. Basilisk no oeste de Minas Gerais demonstram que o diferimento por 30 dias maximiza a taxa de aparecimento foliar, a densidade populacional de perfilhos e a produtividade de massa verde, enquanto o diferimento estendido por 90 dias resulta em

redução de 60% na produtividade e acúmulo expressivo de material morto (47,95%), comprometendo a qualidade da forragem ofertada. O diferimento intermediário de 60 dias representou condição balanceada, com a maior proporção de lâmina foliar (44,27%) aliada a produtividade moderada. Estratégias complementares, como suplementação proteica e energética durante o uso do diferimento, e a introdução de leguminosas no consorciamento, podem mitigar significativamente os efeitos negativos sobre a intensidade de emissão (BERCHIELLI et al., 2012; PEDREIRA et al., 2013; PEREIRA et al., 2026).

A compreensão da morfogênese das forrageiras tropicais constitui base fundamental para o manejo nutricional eficiente e, indiretamente, para a mitigação das emissões entéricas. Características como taxa de aparecimento foliar (TA_F), taxa de alongamento foliar (TA_{IF}), número de folhas vivas por perfilho e duração de vida das folhas determinam a dinâmica de produção e qualidade da forragem (PEREIRA et al., 2011a; PEREIRA, 2013). Em *Megathyrsus maximus* cvs. Mombaça e Tanzânia, estudos clássicos demonstraram que a adubação nitrogenada e a densidade de plantas modulam diretamente as variáveis morfogênicas e o acúmulo de biomassa, com reflexos na produtividade e qualidade do dossel forrageiro (PEREIRA et al., 2011b; PEREIRA et al., 2012). Análises de correlação parcial confirmaram, ainda, que as taxas de aparecimento e alongamento foliar exercem efeito direto sobre o acúmulo de massa de forragem, sendo determinantes para a definição do intervalo ótimo de pastejo (PEREIRA et al., 2017). Pastagens manejadas adequadamente, com altura de resíduo apropriada e período de descanso compatível com a fenologia da espécie, fornecem forragem de maior digestibilidade, reduzindo a perda energética como metano por unidade de produto animal. Adicionalmente, a adubação nitrogenada e o uso de tecnologias como *Pleurotus ostreatus* para a degradação seletiva de lignina podem ampliar a aproveitabilidade dos componentes fibrosos, contribuindo para a redução das emissões e o aumento da eficiência produtiva (BEAUCHEMIN et al., 2020; ROQUES et al., 2024).

Outro aspecto relevante refere-se à eficiência alimentar associada à genética dos animais. O Consumo Alimentar Residual (CAR) destaca-se como um importante indicador, sendo que animais mais eficientes (baixo CAR) apresentam menores emissões de metano por unidade de alimento ingerido. Estudos com bovinos indicam que a seleção genética pode contribuir para a mitigação das emissões sem comprometer o desempenho produtivo. Além disso, diferenças entre raças demonstram que, embora vacas de alta produção apresentem maior emissão absoluta



de metano, sua eficiência relativa por unidade de produto, como leite, é superior, reforçando a importância de métricas baseadas em intensidade de emissão (PEDREIRA et al., 2013).

O perfil de ácidos graxos voláteis (AGV) produzidos no rúmen constitui um indicador-chave da eficiência da fermentação e do potencial de produção de metano. A fermentação acética, predominante em dietas com alto teor de fibra, gera quantidades significativas de hidrogênio livre, favorecendo a metanogênese. Em contraste, a fermentação propiônica atua como dreno alternativo de hidrogênio, reduzindo sua disponibilidade para arqueias metanogênicas e aumentando a eficiência energética do animal. A relação acetato:propionato no líquido ruminal é frequentemente utilizada como indicador da eficiência da conversão energética, sendo que valores entre 2:1 e 3:1 são considerados desejáveis em sistemas mais eficientes. A inclusão de metabólitos secundários bioativos, especialmente terpenoides e taninos condensados, tem demonstrado capacidade de modular esse equilíbrio em favor do propionato, com efeitos positivos sobre o ganho de peso e a produção leiteira (BERCHIELLI et al., 2012; BEAUCHEMIN et al., 2020).

No campo dos aditivos antimetanogênicos sintéticos, recentemente o 3-nitrooxipropanol (3-NOP) foi aprovado em diversos países como inibidor específico da enzima metil-coenzima M redutase (MCR), apresentando reduções de metano superiores a 30% em bovinos leiteiros sem efeitos adversos significativos sobre o desempenho. Embora seja uma alternativa promissora, sua aplicação em sistemas extensivos brasileiros encontra limitações logísticas e econômicas, reforçando a importância das alternativas naturais baseadas em forrageiras tropicais. Compostos halogenados como o bromofórmio, presente em algas marinhas como *Asparagopsis taxiformis*, têm demonstrado reduções ainda mais expressivas em estudos in vitro (acima de 80%), mas levantam preocupações sobre a presença de resíduos no leite e na carne, exigindo cautela em sua adoção em escala comercial. As forrageiras tropicais, ao oferecerem combinações naturais e diversificadas de metabólitos secundários, apresentam vantagem comparativa em termos de segurança alimentar, sustentabilidade e custo (ROQUES et al., 2024; BEAUCHEMIN et al., 2020).

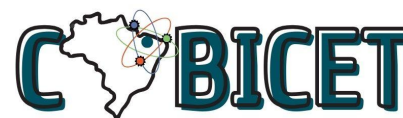
A biotecnologia ruminal e a microbiologia molecular têm emergido como ferramentas de ponta para a caracterização detalhada das comunidades microbianas e a identificação de pontos de intervenção para a redução da metanogênese. Técnicas como sequenciamento de nova geração (NGS) do gene 16S rRNA, metagenômica,

metatranscriptômica e metabolômica permitem uma compreensão sem precedentes da diversidade e função microbiana. Estudos recentes têm identificado correlações entre a abundância de determinados grupos microbianos e o nível de emissão de metano, abrindo caminho para a seleção de animais com microbiota mais eficiente. A integração desses dados ômicos com fenótipos de produtividade e emissões ambientais constitui um campo emergente conhecido como “ruminômica de precisão”, que promete revolucionar o manejo nutricional de ruminantes nas próximas décadas (BEAUCHEMIN et al., 2020; ROQUES et al., 2024).

Cabe ainda destacar que a sazonalidade marcante das pastagens tropicais brasileiras, caracterizada por períodos de seca e águas, exerce influência significativa sobre a qualidade da forragem e, consequentemente, sobre a magnitude das emissões entéricas. Durante o período seco, a forragem apresenta maior teor de fibra em detergente neutro (FDN), menor digestibilidade e menor concentração de proteína bruta, fatores que aumentam a perda energética como metano por unidade de produto. Estratégias como o diferimento de pastagens, ensilagem de excedentes, suplementação estratégica com concentrados e proteínas verdadeiras, além do uso de leguminosas como banco de proteína, podem mitigar significativamente esses efeitos. A adoção de calendários de manejo adaptados às características regionais, considerando a fenologia das forrageiras e o ciclo produtivo dos animais, é fundamental para otimizar a eficiência produtiva e ambiental dos sistemas (BERCHIELLI et al., 2012; PEDREIRA et al., 2013).

A Análise de Ciclo de Vida (ACV ou LCA, do inglês Life Cycle Assessment) constitui ferramenta fundamental para a quantificação integrada das emissões associadas aos sistemas pecuários. Por meio dessa metodologia, é possível contabilizar todas as etapas do processo produtivo, desde a produção de insumos até o produto final, considerando emissões diretas e indiretas. Estudos de ACV em sistemas brasileiros de pecuária de corte indicam pegadas de carbono que variam de 8 a 28 kg CO₂-eq por kg de carne em equivalente carcaça, dependendo do sistema produtivo. Sistemas extensivos com pastagens degradadas apresentam os maiores valores, enquanto sistemas integrados ILPF, com manejo adequado e bom desempenho animal, podem reduzir esse indicador para valores próximos a 9 kg CO₂-eq por kg de carne, demonstrando o potencial mitigador da intensificação sustentável (BEAUCHEMIN et al., 2020; HERRERO et al., 2016).

No contexto específico de Minas Gerais, principal estado produtor de leite do Brasil, a aplicação das



estratégias de mitigação aqui discutidas apresenta particularidades importantes. A região oeste do estado, onde se localiza Divinópolis e o entorno, caracteriza-se pela predominância de sistemas mistos de produção leiteira em pequenas e médias propriedades, com pastagens majoritariamente formadas por *Urochloa decumbens* cv. Basilisk e cv. Marandu. A introdução de leguminosas forrageiras como *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão, *Arachis pintoi* cv. Belmonte e *Leucaena leucocephala* em sistemas consorciados ou em bancos de proteína pode aumentar simultaneamente a qualidade nutricional da dieta animal e contribuir para a mitigação das emissões entéricas. Adicionalmente, o diferimento estratégico de pastagens nas águas para uso na seca, prática tradicional na região, pode ser otimizado mediante o uso de cultivares mais adaptadas e de práticas conservacionistas de solo, contribuindo para a sustentabilidade da pecuária leiteira regional (IBGE, 2024; SEEG, 2023).

O cenário de mercado também exerce influência crescente sobre a adoção de práticas mitigadoras. Mercados consumidores como a União Europeia e os Estados Unidos têm implementado mecanismos como o CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) e exigências de rastreabilidade ambiental, que podem afetar significativamente a competitividade dos produtos brasileiros. Programas de certificação de carne carbono neutro (CCN) e carne carbono negativo (CCN-), desenvolvidos pela EMBRAPA, já demonstram aplicabilidade em sistemas integrados ILPF, agregando valor ao produto final e abrindo novas possibilidades de comercialização em nichos de mercado premium. Iniciativas semelhantes para o setor leiteiro, embora ainda em estágio inicial de desenvolvimento, têm grande potencial de aplicação no estado de Minas Gerais, onde a produção leiteira movimenta cadeia produtiva consolidada e diversificada (BRASIL, 2012; TORRES et al., 2017).

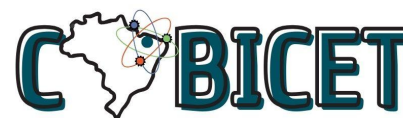
Sob a ótica das projeções futuras, modelos de simulação indicam que a adoção combinada de múltiplas estratégias mitigadoras – recuperação de pastagens, sistemas integrados, melhoramento genético e uso de aditivos baseados em metabólitos secundários – pode reduzir as emissões entéricas brasileiras em até 50% até 2050, sem comprometer a expansão da produção animal. Esse cenário depende, contudo, de investimentos consistentes em pesquisa, extensão rural e infraestrutura, além de marcos regulatórios favoráveis à transição agroecológica. A construção desse cenário passa pela consolidação de redes colaborativas envolvendo universidades, institutos de pesquisa, empresas privadas, cooperativas e produtores rurais, em uma abordagem que articule conhecimento científico, inovação

tecnológica e saberes tradicionais associados ao manejo das pastagens tropicais (FAO, 2023; HERRERO et al., 2016; ROQUES et al., 2024).

No âmbito educacional, a incorporação de ferramentas de ciência de dados na formação em zootecnia representa um avanço importante frente às demandas contemporâneas da agropecuária. O uso de modelagem, análise de dados e simulação permite uma compreensão mais integrada dos sistemas produtivos e das emissões de gases de efeito estufa. Embora nem todos os estudos abordem diretamente essas ferramentas, o IPCC (2019) destaca a importância da análise quantitativa e da modelagem para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação, evidenciando a necessidade de formação de profissionais com competências técnicas e analíticas.

Por fim, sob a perspectiva social, observa-se que a adoção de práticas mitigadoras ainda enfrenta limitações relacionadas à disseminação do conhecimento. A chamada “brecha de mitigação” evidencia a dificuldade de transferência das informações científicas para o campo, limitando a aplicação prática das tecnologias disponíveis. Conforme Herrero et al. (2016), a efetividade das estratégias depende não apenas de sua base técnica, mas também da capacidade de comunicação e adaptação às realidades locais. Nesse sentido, iniciativas de extensão rural, aliadas à produção de materiais acessíveis e capacitação de produtores, são fundamentais. Abordagens baseadas na agroecologia reforçam a importância da construção participativa do conhecimento, promovendo maior engajamento e adoção das práticas sustentáveis (CAPORAL; COSTABEBER, 2002; IPCC, 2019).

O detalhamento dos mecanismos de ação dos taninos condensados merece atenção particular. Esses compostos polifenólicos atuam por meio da formação de complexos estáveis com proteínas em pH ruminal (5,5 a 6,5), reduzindo a degradação proteica no rúmen e aumentando o fluxo de proteína não degradada para o intestino delgado, fenômeno conhecido como efeito “by-pass”. Em pH abaixo de 3,5 ou acima de 7,0, esses complexos se dissociam, permitindo a liberação e absorção dos aminoácidos no abomaso e duodeno. Adicionalmente, taninos condensados exercem efeito antimicrobiano direto sobre arqueias metanogênicas e protozoários ciliados, reduzindo a transferência interespecífica de hidrogênio. Espécies como *Leucaena leucocephala*, *Desmodium ovalifolium* e *Mimosa caesalpinhiifolia* apresentam concentrações de taninos condensados que variam de 2% a 8% da matéria seca, sendo recomendável manter a inclusão entre 2% e 4% para evitar efeitos



adversos sobre a digestibilidade e o consumo (GOEL; MAKKAR, 2012; JAYANEGARA et al., 2012).

As saponinas, por sua vez, constituem uma classe heterogênea de glicosídeos triterpênicos e esteróidicos que apresentam propriedades surfactantes naturais. Sua ação antimetanogênica está relacionada principalmente à defaunação ruminal, ou seja, à redução da população de protozoários ciliados, com os quais arqueias metanogênicas mantêm relação simbiótica de ectoparasitismo. Ao desestabilizarem a membrana lipoproteica dos protozoários, as saponinas indiretamente reduzem a população de arqueias associadas, diminuindo a metanogênese sem necessariamente afetar a degradação da fibra. Plantas como *Quillaja saponaria*, *Yucca schidigera* e *Sapindus saponaria* apresentam concentrações elevadas desses compostos, mas igualmente espécies forrageiras tropicais como *Stylosanthes guianensis* e *Medicago sativa* contêm saponinas em quantidades funcionalmente relevantes. A magnitude da resposta antimetanogênica, contudo, tende a ser temporária, devido à capacidade de adaptação microbiana, o que sugere a necessidade de estratégias de rotação ou combinação com outros compostos bioativos (CARULLA et al., 2005; GOEL; MAKKAR, 2012).

Os terpenoides e óleos essenciais representam uma classe especialmente promissora de mitigadores. Compostos como carvacrol, timol, eugenol, cinamaldeído e limoneno demonstram ação antimicrobiana seletiva sobre microrganismos Gram-positivos e arqueias metanogênicas, com mecanismos que incluem a desestabilização de membranas celulares, inibição de enzimas-chave da metanogênese e modulação do metabolismo energético microbiano. Estudos recentes utilizando técnicas de quimioinformática e modelagem molecular têm identificado interações específicas entre esses compostos e a enzima metil-coenzima M redutase (MCR), permitindo o desenho racional de aditivos com maior especificidade e menor impacto sobre a microbiota benéfica do rúmen. ROQUES et al. (2024) destacam que esse paradigma da “mitigação de precisão” representa o futuro do desenvolvimento de aditivos antimetanogênicos, integrando a riqueza química das plantas tropicais com ferramentas computacionais avançadas como QSAR, docking molecular e inteligência artificial.

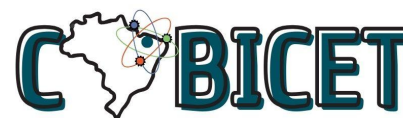
Sob a ótica de sistemas integrados, a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e os sistemas silvipastoris têm demonstrado capacidade de mitigar emissões por múltiplas vias simultâneas. Além de proporcionarem maior diversidade forrageira e melhorarem a qualidade nutricional da dieta animal, esses sistemas promovem o sequestro de carbono no

solo e na biomassa arbórea, reduzem o estresse térmico animal e otimizam o uso da terra. Estima-se que sistemas silvipastoris bem manejados possam compensar de 30% a 100% das emissões entéricas dos animais, dependendo da densidade arbórea e da espécie utilizada. Componentes arbóreos como *Eucalyptus* spp., *Acacia mangium* e *Khaya ivorensis* têm sido amplamente utilizados em arranjos silvipastoris no Brasil Central, enquanto *Leucaena leucocephala* e *Gliricidia sepium* se destacam em sistemas de banco de proteína, fornecendo forragem de alto valor nutricional e com elevado conteúdo de metabólitos antimetanogênicos (BRASIL, 2012; TORRES et al., 2017).

A recuperação de pastagens degradadas constitui outro pilar fundamental da pecuária de baixo carbono. Estima-se que aproximadamente 50% das áreas de pastagem no Brasil apresentem algum nível de degradação, com perdas significativas em capacidade de suporte e qualidade nutricional da forragem. A reforma dessas áreas com cultivares modernas de *Urochloa brizantha* (cv. Marandu, Piatã, Xaraés, BRS Paiguá), *Megathyrsus maximus* (cv. Mombaça, Tanzânia, BRS Zuri, BRS Tamani) e leguminosas associadas pode aumentar a produtividade animal em 2 a 3 vezes, reduzindo proporcionalmente a intensidade de emissão de metano por unidade de produto. Adicionalmente, a adubação nitrogenada criteriosa, baseada em análise de solo e nas exigências da cultura, contribui para a manutenção da produtividade e qualidade das pastagens, embora deva ser monitorada para evitar emissões indiretas de N₂O (SEEG, 2023; IBGE, 2024).

Sob o ponto de vista metodológico, a mensuração das emissões entéricas tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Além da técnica do hexafluoreto de enxofre (SF₆), já consolidada, novas tecnologias como o sistema GreenFeed, câmaras respirométricas, sensores de fluxo expiratório e técnicas baseadas em isótopos estáveis de carbono têm sido empregadas para refinar as estimativas. Cada técnica apresenta vantagens e limitações, sendo a escolha do método dependente do objetivo do estudo, das condições experimentais e dos recursos disponíveis. A integração de múltiplas técnicas, aliada a modelos preditivos baseados em dados de consumo, qualidade da dieta e características dos animais, tem sido recomendada para a construção de inventários mais precisos de emissões no setor pecuário (BERCHIELLI et al., 2012; PEDREIRA et al., 2013).

Por fim, a visão sistêmica das emissões de metano deve considerar a noção de intensidade de emissão, expressa em kg de CO₂-equivalente por kg de produto (carne, leite ou proteína). Sob essa ótica, sistemas mais intensificados e tecnificados, embora



apresentem maior emissão absoluta, frequentemente exibem menor intensidade de emissão em razão da maior eficiência produtiva. Essa abordagem é particularmente relevante para o cenário brasileiro, no qual a coexistência de sistemas extensivos e intensivos demanda estratégias diferenciadas. A combinação de melhoramento genético animal, manejo nutricional adequado, uso de forrageiras com propriedades antimetanogênicas e adoção de sistemas integrados constitui o caminho mais promissor para a construção de uma pecuária simultaneamente produtiva, lucrativa e ambientalmente sustentável (BEAUCHEMIN et al., 2020; HERRERO et al., 2016; ROQUES et al., 2024).

CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados e da literatura científica, evidencia-se que o uso de forrageiras tropicais contendo metabólitos secundários bioativos constitui uma estratégia promissora para a mitigação das emissões de metano entérico em sistemas pecuários. Compostos como taninos, saponinas e terpenoides atuam por diferentes mecanismos bioquímicos no ambiente ruminal, promovendo reduções significativas na produção de metano, ao mesmo tempo em que podem contribuir para melhorias na eficiência energética dos animais. Nesse sentido, a mitigação das emissões não deve ser compreendida apenas como uma exigência ambiental, mas também como uma oportunidade de intensificação sustentável da produção.

Os resultados demonstram que a integração entre nutrição animal, escolha de espécies forrageiras e manejo adequado pode gerar ganhos simultâneos nos âmbitos ambiental e econômico, com destaque para a redução das perdas energéticas e o aumento da eficiência alimentar. No entanto, a variabilidade nas respostas observadas indica que a eficácia dessas estratégias depende de fatores como nível de inclusão dos compostos bioativos, adaptação da microbiota ruminal, condições edafoclimáticas e características dos sistemas produtivos. Dessa forma, não há uma solução única, sendo necessário o desenvolvimento de abordagens adaptadas às realidades locais.

Adicionalmente, destaca-se o papel da genética animal e das estratégias nutricionais complementares, como o uso de aditivos e concentrados, na redução da intensidade de emissão por unidade de produto. A adoção de métricas mais abrangentes, que considerem a eficiência produtiva associada às emissões, mostra-se fundamental para uma avaliação mais precisa da sustentabilidade dos sistemas pecuários.

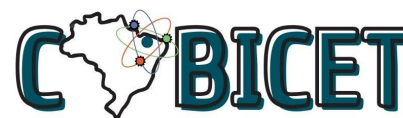
No âmbito educacional e social, torna-se evidente que a superação da chamada “brecha de mitigação” é um dos principais desafios para a efetiva implementação dessas estratégias no campo. A disseminação do conhecimento técnico-científico, aliada à capacitação de produtores e técnicos, é essencial para promover a adoção de práticas sustentáveis. Nesse contexto, a integração entre ensino, pesquisa e extensão desempenha um papel central, contribuindo para a formação de profissionais capacitados e para a democratização do acesso à informação.

Por fim, conclui-se que a mitigação das emissões de metano na pecuária depende de uma abordagem integrada, que combine avanços científicos, inovação tecnológica e estratégias de transferência de conhecimento. Estudos futuros devem priorizar avaliações de longo prazo em condições reais de produção, bem como a integração de múltiplas estratégias mitigadoras, visando a construção de sistemas pecuários mais resilientes, eficientes e alinhados às demandas globais por sustentabilidade.

A adoção de tecnologias de mitigação, como a substituição parcial de fontes proteicas tradicionais por nitrato de cálcio, demonstra ser não apenas ambientalmente eficaz, mas também financeiramente atrativa para o produtor. De acordo com os dados de Natel et al. (2016), sistemas que utilizam 1,5% e 3% de nitrato na dieta apresentaram indicadores de rentabilidade superiores ao sistema controle, com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 14% e 17%, respectivamente, superando a taxa mínima de atratividade de 10% ao ano.

Cabe destacar que o desenvolvimento de políticas públicas específicas, como o aprimoramento do Plano ABC+ e a criação de mecanismos de crédito de carbono direcionados ao setor pecuário, é fundamental para viabilizar economicamente a transição para sistemas de baixo carbono. A valoração dos serviços ambientais prestados pela pecuária sustentável, incluindo o sequestro de carbono no solo e na biomassa arbórea de sistemas integrados, pode constituir importante incentivo à adoção de práticas mitigadoras pelos produtores rurais. A integração entre políticas governamentais, mercado financeiro, pesquisa científica e extensão rural é condição sine qua non para a transformação efetiva do setor agropecuário.

No tocante às perspectivas de pesquisa, identifica-se a necessidade de estudos multidisciplinares de longo prazo que avaliem não apenas a eficiência de mitigação em condições controladas, mas também a viabilidade econômica, a aceitação pelos produtores e os impactos ambientais agregados das diferentes



estratégias. A combinação de múltiplas abordagens, como uso simultâneo de forrageiras com metabólitos secundários, seleção genética para baixo CAR (Consumo Alimentar Residual), suplementação estratégica e adoção de sistemas integrados, deve ser priorizada nas próximas décadas. Adicionalmente, o uso de ferramentas de inteligência artificial e ciência de dados para a otimização do manejo nutricional e a predição das emissões em diferentes cenários produtivos representa fronteira promissora a ser explorada.

Por fim, é importante reafirmar que a construção de uma pecuária de baixo carbono no Brasil não representa apenas um compromisso ambiental, mas também uma oportunidade estratégica de posicionamento no mercado global, marcado pela crescente exigência de produtos com baixa pegada de carbono. O Brasil, por seu protagonismo no setor pecuário mundial e por possuir vasta diversidade de forrageiras tropicais com potencial mitigador, apresenta condições privilegiadas para liderar essa transformação. A consolidação desse paradigma depende, contudo, da articulação contínua entre ciência, política pública, mercado e sociedade, em um esforço coletivo de inovação e sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) pelo apoio acadêmico e ao Grupo de Estudos em Nutrição e Alimentação de Forrageiras (GNAFOR) pelo suporte técnico-científico e pelas contribuições no desenvolvimento das discussões deste trabalho. Reconhece-se também a importância das iniciativas de pesquisa e extensão que possibilitam a integração entre conhecimento científico e prática no campo.

REFERÊNCIAS

BEAUCHEMIN, K. A. et al. Invited review: current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*, v. 103, n. 10, p. 8632–8655, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17896>.

BERCHIELLI, T. T.; MESSANA, J. D.; CANESIN, R. C. Produção de metano entérico em pastagens tropicais. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador, v. 13, n. 4, p. 954–968, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura (Plano ABC)*. Brasília, DF, 2012.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. *Agroecologia: conceitos e princípios*. Brasília: Embrapa, 2002.

FAO. *Pathways towards lower emissions: a global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock supply chains*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.

GOEL, G.; MAKKAR, H. P. S. Methane mitigation from ruminants using tannins and saponins. *Tropical Animal Health and Production*, v. 44, n. 4, p. 729–739, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-011-9966-2>.

HERRERO, M. et al. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 5, p. 452–461, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>.

IBGE. *Pesquisa da Pecuária Municipal*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023.

IBGE. *Produção da Pecuária Municipal: leite*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024.

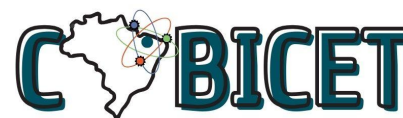
IPCC. *Climate change 2023: synthesis report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

JAYANEGARA, A. et al. Meta-analysis of the relationship between dietary tannin level and methane formation in ruminants. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, v. 96, n. 3, p. 365–375, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01172.x>.

LASCANO, C. E.; CÁRDENAS, E. Alternatives for methane emission mitigation in livestock systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, p. 175–182, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300020>.

NATEL, A. S. et al. Otimização da pecuária nacional de forma sustentável. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, Salvador, v. 17, n. 3, p. 529–544, 2016.

PEDREIRA, M. S. et al. Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in beef cattle fed different dietary concentrate levels. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 42, n. 8, p. 592–598, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000800005>.



PEREIRA, V. V. et al. Características morfológicas e estruturais de capim-mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 12, p. 2681–2689, 2011a.

PEREIRA, V. V. et al. Morphogenesis of Tanzania guinea grass under nitrogen doses and plant densities. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 12, p. 2681–2689, 2011b.

PEREIRA, V. V. et al. Biomass accumulation in mombasa guineagrass plants under different levels of nitrogen supply and plant densities. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 41, n. 5, p. 1118–1126, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012001200013>.

PEREIRA, V. V. A importância das características morfológicas sobre o fluxo de tecidos no manejo de pastagens tropicais. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 6, n. 2, p. 273–292, 2013.

PEREIRA, V. V. et al. Partial correlation analysis in morphogenesis and herbage accumulation of Mombasa grass under nitrogen levels and plant densities. *Ciência Rural*, v. 47, n. 8, e20160532, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160532>.

PEREIRA, V. V. et al. Produtividade forrageira, morfogênese e estabilidade demográfica de perfilhos de *Urochloa decumbens* cv. Basilisk sob diferimento durante o período seco. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 9, n. 1, 2026. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv9n1-196>.

ROQUES, S. et al. Recent advances in enteric methane mitigation and the long road to sustainable ruminant production. *Annual Review of Animal Biosciences*, v. 12, p. 321–343, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020723-103500>.

SEEG. *Emissões de gases de efeito estufa no Brasil: setor agropecuário*. São Paulo: Observatório do Clima; Imaflora, 2023.

CARULLA, J. E. et al. Supplementation of *Acacia mearnsii* tannins decreases methanogenesis and urinary nitrogen in forage-fed sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, v. 56, n. 9, p. 961–970, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR05022>.

IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.

SOUZA, S. O. et al. Metabólitos secundários em forrageiras tropicais: potencial antimetanogênico e perspectivas para a pecuária sustentável. *Anais do VII CoBICET*, Divinópolis, 2026.

TIMMERMAN, M. et al. Effects of plant-derived essential oils and their compounds on enteric methane emissions in ruminants: a review. *Animal Feed Science and Technology*, v. 282, p. 115128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115128>.

TORRES, C. M. M. E. et al. Sistemas integrados como alternativa para mitigação de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 7, n. 2, p. 47–57, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v7i2.382>.